

УДК 518.5; 621.746.62

**В. Г. Кострица, О. А. Кострица \***

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского, Харьков  
\*Харьковский авиационный институт, Харьков

## РАЗВИТИЕ ФОРМУЛ НЕХЕНДЗИ-ГИРШОВИЧА В НАУКЕ О ЛИТЬЕ. Сообщение 4<sup>1</sup>

*Представлена и решена новая задача математического описания и оптимизации усадочной пористости с интегральной мерой её по критерию наименьшего достаточного расхода металла на отливку. На этой основе создан и конкретно реализуется метод расчёта и проектирования предложенных далее оптимальных технологий формирования отливок.*

**Ключевие слова:** метод расчёта, элементарная отливка, проектирование, усадочная пористость, топологическая модель отливки, механизм прессования.

*Представлено та вирішено задачу математичного опису й оптимізації усадкової пористості з інтегральною мірою її за критерієм найменшої достатньої витрати металу на виливок. На цій основі створена і конкретно реалізовується метод розрахунку і проектування запропонованих далі оптимальних технологій формування виливків.*

**Ключові слова:** метод розрахунку, елементарний виливок, проектування, усадкова пористість, топологічна модель виливка, механізм пресування.

*There are presented and solved a new mathematical description and shrinkage porosity optimization with the integral measure of its by criterion of least sufficient consumption of metal for the cast. On this basis found and specifically realized account method and design of the proposed further optimal technologies of the casting formation.*

**Keywords:** account method, the elementary casting, design, shrinkage porosity, topological model of casting, extrusion mechanism.

### Введение<sup>2</sup>

В задаче-1 [54, п. 6] изложен метод её решения [54, разделы 9 и 10], направленный на формирование плотных гравитационных отливок при наименьшем достаточном расходе металла на прибыль. В настоящей задаче-2 предмет исследований – разработка оптимальных технологий изготовления отливок по критерию наименьшего достаточного расхода металла.

По физическому содержанию и математической постановке задача-1 остаётся базовой по отношению к задаче-2.

---

<sup>1</sup> Сообщения 1, 2 см. в журналах «Процессы литья». – 2010. – № 2, 3. – С. 25-35, 16-23. Сообщение 3 см. в журнале «Процессы литья». – 2014. – № 2. – С. 34-49.

<sup>2</sup> Разделы 13, 14, 15 (кроме п. 15.1.1, 15.1.2) написаны В. Г. Кострицей; пункты 15.1.1, 15.1.2 – О. А. Кострицей и В. Г. Кострицей в порядке обсуждения.

В сообщении 4 нумерация списка литературы, математических выражений, таблиц, рисунков, условных обозначений продлжается (начало в сообщениях 1, 2, 3).

### 11. Задача-2 о формировании плотных, без усадочных трещин, отливок при наименьшем достаточном расходе металла на отливку

Названную задачу-2 вследствие её сложности мы раскрываем и решаем далее последовательно в разделах 13,14,15.

### 12. Концепция решения задачи-2

#### 12.1. Научный подход

##### 12.1.1. Концепция абсолютно простого

Прежде всего выбираем научный подход к решению рассматриваемой задачи – согласно науке логики Г. В. Ф. Гегеля: «Уже одно то обстоятельство, что наука должна начинать с абсолютно простого и, стало быть, наиболее всеобщего и пустого, требует, чтобы способ изложения её допускал только такие совершенно простые выражения для уяснения простого без какого-либо добавления хотя бы одного слова» [17, с. 91].

##### 12.1.2. Концепция абстрактного

«...познанию легче постичь абстрактное простое определение мысли, нежели конкретное...» [38, с. 263].

«...повсюду абстрактное должно составлять начало и ту стихию, в которой и из которой развёртываются особенности и богатые образы конкретного» [38, с. 264].

##### 12.1.3. Концепция доказанного

«Но какое бы содержание ни имело научное положение, более совершенное или менее совершенное, оно должно быть доказано» [38, с. 273].

### 13. Развитие понятий об усадочной пористости с интегральной мерой в топологической модели элементарной отливки

Топологическая модель элементарной отливки определяется её содержанием по п.3.1.5 в [33] и затем становится предметом исследований, направленных на решение задачи-2.

#### 13.1. Понятие о внутренней усадочной пористости с интегральной мерой в топологической модели элементарной отливки

В [32, п. 2.5.1] нами предложена простая функция внутренней усадочной пористости с разностной мерой – выражение (10). Теперь с использованием (10) переходим к определению понятия о внутренней усадочной пористости с интегральной мерой в топологической модели элементарной отливки [33, п. 3.1.5].

Для чего разделяем исходную топологическую модель элементарной отливки на  $N$  малых частей при  $N \rightarrow \infty$  (большое число):

$$V_{от}(T_0) = V_{от,ч}(T_0)N, \quad (74)$$

где нижний индекс  $ч$  обозначает малую часть отливки при начальной её температуре  $T_0$ .

Далее записываем выражение (10) для каждой малой части отливки и объединяем их операцией интегрирования. Получаем следующее исходное математическое определение нового понятия – о внутренней усадочной пористости с интегральной мерой её в топологической модели элементарной отливки:

$$\Pi_y^{//}(T_{i-j}) =_{Def} \int_{V_M(T_j)}^{V_{от}(T_i)} \frac{dV_{п,у}(T_{i-j})}{V_{от}(T_j)}, \quad (75)$$

где  $i = 0, 1, 2; j = 1, 2, 3; i < j$ .

Или после интегрирования (75):

$$\Pi_{y'}^{//}(T_{i-j}) = \ln \frac{\rho_M(T_j)}{\rho_M(T_i)}. \quad (76)$$

### 13.2. Понятие о наружной усадочной пористости с интегральной мерой в топологической модели элементарной отливки

На основе математической модели (11-12) в [32, п. 2] и с учётом условий дискретизации (74) топологической модели элементарной отливки [33, п. 3.1.5] записываем математическое выражение нового понятия – о наружной усадочной пористости с интегральной мерой её в топологической модели элементарной отливки:

$$\Pi_{н.у}^{//}(T_{i-j}) =_{\text{Def}} \int_{V_{от}(T_j)}^{V_{от}(T_i)} \frac{|-dV_{от}(T_{i-j})|}{V_{от}(T_j)}, \quad (77)$$

где  $d$  – дифференциал (изменение параметра отливки);  $| |$  – знак абсолютной величины пористости (её параметра), соответствует способу сравнения родов пористости [32, табл. 2].

Или после интегрирования:

$$\Pi_{н.у}^{//}(T_{i-j}) = -\ln \frac{\rho_{от}(T_j)}{\rho_{от}(T_i)} \quad (78)$$

где  $i = 0, 1, 2; j = 1, 2, 3; i < j$ .

### 13.3. Понятие об усадке с интегральной мерой её в топологической модели элементарной отливки

На основе математической модели усадки отливки (14) в [32, п. 2.5.3], [33, п. 4.1] и с учётом условий дискретизации (74) топологической модели элементарной отливки [33, п. 3.1.5] записываем общее математическое выражение нового понятия – об усадке с интегральной мерой её в топологической модели элементарной отливки:

$$U_{от}^{//}(T_{i-j}) =_{\text{Def}} \int_{V_{от}(T_0)}^{V_{от}(T_i)} \frac{dV_{от}(T_{i-j})}{V_{от}(T_0)}, \quad (79)$$

где  $i = 0, 1, 2; j = 1, 2, 3; i < j$ .

13.4. Используемое понятие мера мы интерпретируем по А. Н. Колмогорову и С. В. Фомину [29, с. 235].

## 14. Метод расчёта и проектирования технологий формирования отливок с интегральной мерой при наименьшем достаточном расходе металла на отливку

### 14.1. Постановка задачи

Ранее в [54] мы описали постановку и решение задачи-1 о формировании усадочной пористости отливок с разностной мерой при наименьшем достаточном расходе металла на прибыль.

Ниже предварительно представляем новый процесс формирования усадочной

## Затвердевание сплавов

пористости с интегральной мерой её при наименьшем достаточном расходе металла на отливку.

Далее с использованием названных выше новых понятий решаем задачу-2.

14.2. Дифференциальное уравнение формирования усадочной пористости с интегральной мерой её в топологической модели элементарной отливки

14.2.1. Необходимое дифференциальное уравнение составляем на базе полного разностного уравнения (26 б) из [54]:

$$\Pi'_y(T_{o-j}) - \frac{\rho_M(T_o)}{\rho_M(T_j)} \Pi'_{н.у.}(T_{o-j}) + \frac{\rho_M(T_o)}{\rho_M(T_j)} = 1. \quad (26б)$$

Для чего выбираем крайне узкий температурный интервал математического описания процесса формирования усадочной пористости в отливке:

$$T_o - T = \Delta T \rightarrow 0 \quad (80)$$

Затем записываем исходное выражение усадочной пористости по (10) из [32] в условиях (80) для периода слева от знака равенства в (80), где подвижную границу  $T$  фиксируем в виде  $T_j$ :

$$\Pi'_y(T_{i-j}) = \frac{V_{н.у.}(T_{i-j})}{V_{от}(T_j)}. \quad (81)$$

14.2.2. Аналогично записываем исходное математическое выражение наружной усадочной пористости по (11-12) из [32]:

$$\Pi'_{н.у.}(T_{i-j}) = -\frac{[V_{от}(T_i) - V_{от}(T_j)]}{V_{от}(T_j)} = -\left[ \frac{V_{от}(T_i)}{V_{от}(T_j)} - 1 \right]. \quad (82)$$

Далше для (26 б) в [54] совершаем переходы других параметров:

$$\Delta V_{н.у.}(T) \approx dV_{н.у.}(T); \quad (83)$$

$$\Delta V_{н.п.у.}(T) \approx dV_{н.п.у.}(T); \quad (84)$$

$$\Delta V_{от}(T) \approx dV_{от}(T); \quad (85)$$

$$\rho_M(T_j) = \rho_M(T_o) + d\rho_M(T_j). \quad (86)$$

14.2.3. Теперь преобразуем (26 б) с использованием (80-86) за пять шагов: ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ . Получаем:

$$(\alpha_1) \frac{dV_{н.у.}(T_{o-j})}{V_{от}(T_j)} - \frac{\rho_M(T_j) - d\rho_M(T_j)}{\rho_M(T_j)} \left[ -\frac{V_{от}(T_o)}{V_o(T_j)} + 1 \right] - \frac{d\rho_M(T_i)}{\rho_M(T_j)} = 0;$$

$$(\alpha_2) \frac{dV_{н.у.}(T_{o-j})}{V_{от}(T_j)} - \left[ 1 - \frac{d\rho_M(T_j)}{\rho_M(T_j)} \right] \left[ \frac{V_{от}(T_o) - V_{от}(T_j)}{V_{от}(T_j)} \right] - \frac{d\rho_M(T_i)}{\rho_M(T_j)} = 0;$$

$$(\alpha_3) \frac{V_{от}(T_o) - V_{от}(T_j)}{V_{от}(T_j)} \approx \frac{\Delta V_{от}(T_{o-j})}{V_{от}(T_{o-j})};$$

$$(a_4) \quad \frac{dV_{\text{п.у}}(T_{0-j})}{V_{\text{от}}(T_j)} - \left[ 1 - \frac{d\rho_{\text{м}}(T_j)}{\rho_{\text{м}}(T_j)} \right] \left[ \frac{dV_{\text{от}}(T_i)}{V_{\text{от}}(T_i)} \right] - \frac{d\rho_{\text{м}}(T_j)}{\rho_{\text{м}}(T_j)} = 0.$$

14.2.4. Выполняем упрощения в  $(\alpha_1)$ , получаем  $(\alpha_2)$ . Подставляем  $(\alpha_3)$  в  $(\alpha_2)$ , получаем  $(\alpha_4)$  и находим  $(\alpha_5)$ :

$$(a_5) \quad \frac{dV_{\text{п.у}}(T_j)}{V_{\text{от}}(T_j)} - \frac{dV_{\text{от}}(T_j)}{V_{\text{от}}(T_j)} - \frac{d\rho_{\text{м}}(T_j)}{\rho_{\text{м}}(T_j)} \frac{dV_{\text{от}}(T_j)}{V_{\text{от}}(T_j)} - \frac{d\rho_{\text{м}}(T_j)}{\rho_{\text{м}}(T_j)} = 0.$$

В математическом выражении  $(\alpha_5)$  третье слагаемое является собой бесконечно малую величину второго порядка и поэтому исключается из дальнейшего рассмотрения. В результате получаем:

14.2.5. Созданное нами дифференциальное уравнение:

$$\frac{dV_{\text{п.у}}(T_j)}{V_{\text{от}}(T_j)} - \frac{dV_{\text{от}}(T_j)}{V_{\text{от}}(T_j)} - \frac{d\rho_{\text{м}}(T_j)}{\rho_{\text{м}}(T_j)} = 0. \quad (87)$$

14.3. Решение дифференциального уравнения (87).

14.3.1. Интегрируем уравнение (87) с учётом (75, 76):

$$\int_{V_{\text{м}}(T_j)}^{V_{\text{от}}(T_i)} \frac{dV_{\text{п.у}}(T_{i-j})}{V_{\text{от}}(T_j)} - \int_{V_{\text{от}}(T_j)}^{V_{\text{от}}(T_i)} \frac{dV_{\text{от}}(T_{i-j})}{V_{\text{от}}(T_j)} - \int_{\rho_{\text{м}}(T_i)}^{\rho_{\text{м}}(T_j)} \frac{d\rho_{\text{м}}(T_{i-j})}{\rho_{\text{м}}(T_j)} = C, \quad (88)$$

где  $i = 0, 1, 2; j = 1, 2, 3; i < j$ .

Определяем  $C$  при  $T_j = T_i$ . Имеем: в 1-м слагаемом пределы интегрирования  $V_{\text{м}}(T_j) = V_{\text{от}}(T_i)$  вследствие чего 1-е слагаемое равно нулю; во 2-м слагаемом при  $T_j = T_i$  имеет место  $dV_{\text{от}}(T_{i-j}) = 0$  вследствие чего 2-е слагаемое равно нулю; в 3-м слагаемом пределы интегрирования  $\rho_{\text{м}}(T_j) = \rho_{\text{м}}(T_i)$  вследствие чего 3-е слагаемое равно нулю. В итоге  $C = 0$ .

14.3.2. Приводим решение дифференциального уравнения (87) с учётом (75, 76) и табл. 2 в [32]:

$$\Pi_{\text{у}}^{\prime\prime}(T_{i-j}) - \Pi_{\text{п.у}}^{\prime\prime}(T_{i-j}) - \ln \frac{\rho_{\text{м}}(T_j)}{\rho_{\text{м}}(T_i)} = 0, \quad (89)$$

где  $i = 0, 1, 2; j = 1, 2, 3; i < j$ .

Выражение (89) – уравнение состояния общей (внутренней и наружной) усадочной пористости с интегральной мерой её в топологической модели элементарной отливки.

14.3.3. Записываем на основе (89) уравнение состояния общей усадочной пористости с интегральной мерой в топологической модели элементарной отливки по стадиям её формирования [32, табл. 1]:

– на стадии II (от  $T_0$  до  $T_1$ ):

$$\Pi_{\text{у}}^{\prime\prime}(T_{0-1}) - \Pi_{\text{п.у}}^{\prime\prime}(T_{0-1}) = \ln \frac{\rho_{\text{м}}(T_1)}{\rho_{\text{м}}(T_0)}; \quad (90)$$

– на стадии III (от  $T_1$  до  $T_2$ ):

$$\Pi_{y'}^{\prime\prime}(T_{1-2}) - \Pi_{н.у}^{\prime\prime}(T_{1-2}) = \ln \frac{\rho_M(T_2)}{\rho_M(T_1)}; \quad (91)$$

– на стадии IV (от  $T$  до  $T_2$ ):

$$\Pi_{y'}^{\prime\prime}(T_{2-3}) - \Pi_{н.у}^{\prime\prime}(T_{2-3}) = \ln \frac{\rho_M(T_3)}{\rho_M(T_2)}. \quad (92)$$

14.3.4. Приобщаем следующее необходимое условие для решения уравнения (89):

$$\Pi_{y'}^{\prime\prime}(T_{i-j}) = 0. \quad (93)$$

Необходимое условие (93) определяется разработанной нами новой технологией изготовления отливок авиационной детали Корпус [54], исключающей наличие в отливке усадочных дефектов.

14.3.5. Если необходимое условие (93) подставить в (89) – находим выражение соответствующей наружной усадочной пористости:

$$-\Pi_{н.у}^{\prime\prime}(T_{i-j}) = \ln \frac{\rho_M(T_j)}{\rho_M(T_i)}. \quad (94)$$

14.3.6. Ранее в [54, п. 9.5.2] мы записали в разностной форме выражение дефицита металла для подпитывания отливки детали Корпус:

$$\left| -W_{y'}^{\prime}(T_{0-j}) \right| = V_{от}(T_j) \Pi_{н.у}^{\prime}(T_{0-j}), \quad (53)$$

где  $j = 1, 2, 3; T_j < T_0$ .

14.3.7. Теперь по схеме (53) записываем в интегральной форме выражение дефицита металла для подпитывания отливки детали Корпус [54, п.8]:

$$\left| -W_{y'}^{\prime\prime}(T_{0-j}) \right| = V_{от}(T_j) \Pi_{н.у}^{\prime\prime}(T_{0-j}), \quad (95)$$

где  $j = 1, 2, 3$ .

14.3.8. Наконец, в (95) подставляем (94) и находим следующее выражение (96) дефицита металла для подпитывания отливки детали Корпус:

$$\left| -W_{y'}^{\prime\prime}(T_{0-j}) \right| = V_{от}(T_j) \left[ -\ln \frac{\rho_M(T_j)}{\rho_M(T_i)} \right], \quad (96)$$

где  $i = 0, 1, 2; j = 1, 2, 3; i < j$ .

Или по стадиям формирования отливки:

$$\left| -W_{y'}^{\prime\prime}(T_{0-1}) \right| = V_{от}(T_{0-1}) \left[ -\ln \frac{\rho_M(T_1)}{\rho_M(T_0)} \right], \quad (97)$$

$$\left| -W_{y'}^{\prime\prime}(T_{1-2}) \right| = V_{от}(T_{1-2}) \left[ -\ln \frac{\rho_M(T_2)}{\rho_M(T_1)} \right], \quad (98)$$

$$\left| -W_{y'}^{\prime\prime}(T_{2-3}) \right| = V_{от}(T_{2-3}) \left[ -\ln \frac{\rho_M(T_3)}{\rho_M(T_2)} \right]. \quad (99)$$

## Затвердевание сплавов

14.4. *Полезные свойства созданной выше математической модели (89).*

14.4.1. Математическая модель (89) обладает аддитивностью – свойством величин, состоящего в том, что значение величины, соответствующее целому объекту, равно сумме значений величин, соответствующих его частям при любом разбиении объекта на части [58].

14.4.2. Названное выше свойство аддитивности порождается введённой В. Г. Кострицей «интегральной мерой усадочной пористости в топологической модели элементарной отливки» в разделах 13-15.

Реализуется рассматриваемое свойство аддитивности тем, что по общему выражению (96) мы записали частные (97, 98, 99) и на этой основе можем, например, оптимизировать технологический процесс производства отливок согласно [32, с. 31].

15. *Разработка машинных оптимальных технологий формирования плотных, без усадочных трещин, отливок при наименьшем достаточном расходе металла на отливку.*

15.1. *Подготовительные вычислительные эксперименты.*

15.1.1. Для выражений (97, 98, 99) определяем объём отливки детали Корпус [54, п. 8, п. 9] по данным табл. 3:

$$V_{\text{от}}(T_1) = \frac{M_{\text{от}}(T_1)}{\rho_{\text{от}}(T_1)} = \frac{900 \text{ Г}}{7,035 \text{ Г / см}^3} = 127,9318 \text{ см}^3; \quad (100)$$

$$V_{\text{от}}(T_2) = \frac{M_{\text{от}}(T_2)}{\rho_{\text{от}}(T_2)} = \frac{900 \text{ Г}}{7,265 \text{ Г / см}^3} = 123,8816 \text{ см}^3; \quad (101)$$

$$V_{\text{от}}(T_3) = \frac{M_{\text{от}}(T_3)}{\rho_{\text{от}}(T_3)} = \frac{900 \text{ Г}}{7,870 \text{ Г / см}^3} = 114,3583 \text{ см}^3 \quad (102)$$

15.1.2. По выражениям (97, 98, 99) вычисляем дефицит металла для подпитывания отливки детали Корпус, используя значения объёма отливки по (100, 101, 102) и значения плотности металла согласно табл. 3 в [54]:

$$\left| -W_y''(T_{0-1}) \right| = 127,9318 \left[ -\ln \frac{7,035}{6,937} \right] = -1,795 \text{ см}^3; \quad (103)$$

$$\left| -W_y''(T_{1-2}) \right| = 123,8816 \left[ -\ln \frac{7,265}{7,035} \right] = -3,957 \text{ см}^3; \quad (104)$$

$$\left| -W_y''(T_{2-3}) \right| = 114,3583 \left[ -\ln \frac{7,870}{7,265} \right] = -9,147 \text{ см}^3. \quad (105)$$

15.2. *Машинные оптимальные технологии формирования плотных, без усадочных трещин, отливок.*

15.2.1. *Формулирование и метод решения проблемы*

В 1979 г. в ВНИТэлектромаше В. Г. Кострица в работе [27] создал математическую модель интенсификации технологий формирования плотных отливок.

Как следует из [27, с. 9] «...с увеличением степени интенсификации технологии формирования отливок возрастают её устойчивость, стабильность и надёжность, снижается чувствительность к вариации её параметров.

Наиболее интенсивным является процесс литья под давлением. Для него характерны применение при литье различных роторов почти одинаковых параметров и



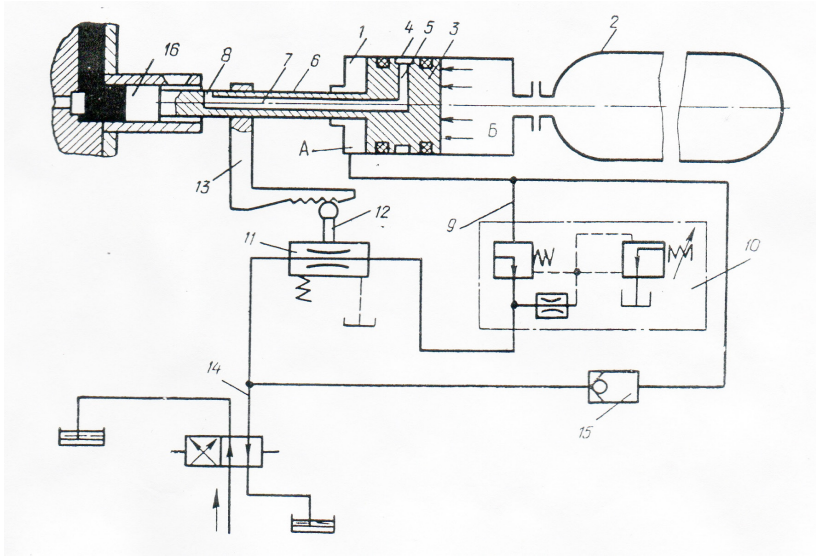


Рис. 6. Схема механизма прессования машины литья под давлением

режимов, использование неподогретых сердечников. Литьё под давлением – наиболее экономичный процесс формирования отливок роторов малых и средних габаритов» [27, с. 9].

15.2.2. На изложенной выше основе В. В. Поливанов и В. Г. Кострица в 1973-1976 гг. в ВНИИТЭлектромаше разработали новые оптимальные по быстродействию механизмы прессования к машинам для литья под давлением [55, 56, 57].

15.2.3. Для решения исходной задачи-2 мы, согласно п.12.1.1.0. концепции абсолютно простого, выбрали механизм прямого газового прессования [55].

15.3.1. *Конструкция и работа механизма прямого газового прессования* [55].

Механизм прессования содержит силовой цилиндр 1, соединённый с ним пневмоаккумулятор 2, заполненный сжатым газом. В силовом цилиндре 1 установлен поршень 3, на цилиндрической поверхности которого выполнены кольцевая канавка 4 и радиальный канал 5. В штоке 6 поршня 3 выполнен осевой канал 7 с радиальным выходом 8.

Кольцевая канавка 4 служит для отвода в атмосферу утечек газа и жидкости через уплотнения поршня 3 и препятствует взаимному загрязнению рабочих сред силового цилиндра.

Штоковая полость А механизма прессования посредством трубопровода 9 соединена последовательно с редукционным клапаном 10 и регулятором скорости 11, который поводком 12 взаимодействует с волнообразной рабочей поверхностью копира 13, установленного на штоке 6 поршня 3.

При подаче напора в трубопровод 14 жидкость через обратный клапан 15 поступает в штоковую полость А прессующего цилиндра 1 и отводит поршень 3 вправо, сжимая газ, заполняющий бесштоковую полость Б.

При соединении трубопровода 14 со сливным резервуаром поршень 3 под действием сжатого газа в полости Б и пневмоаккумуляторе 2 переместится влево, вытесняя жидкость из штоковой полости А через редукционный клапан 10 и регулятор скорости 11.

Плунжер 16 при этом заполняет пресс-форму расплавом. Копир 13, перемещаясь вместе со штоком 6, управляет золотником регулятора скорости 11, увеличивая или уменьшая расход жидкости через регулятор скорости 11.

Редукционный клапан 10 поддерживает постоянное давление перед регулятором скорости 11 независимо от колебаний нагрузки на штоке поршня 3, поэтому изменение скорости движения поршня зависит только от степени перекрытия дросселя скорости 11.

При остановке поршня 3 в конце хода прессования расход через регулятор ско-



рости 11 прекращается, вследствие чего давление в трубопроводе между редукционным клапаном 10 и регулятором скорости 11 падает.

Редукционный клапан 10 открывается, соединяя штоковую полость А силового цилиндра 1 со сливом. Вследствие сброса давления в штоковой полости, усилие штока поршня 3 возрастает, и происходит подпрессовка отливаемого изделия.

Таким образом, подпрессовка начинается автоматически в момент окончания заполнения формы расплавом и не зависит от колебаний дозы расплава в камере прессования литей машины.

Применение описываемого механизма позволяет повысить качество отливок и стабильность их свойств.

15.3.2. *Испытание машины для литья под давлением мод. 71107 г с механизмом прямого газового прессования* [55], рис. 6.

На Тираспольском заводе литейных машин в специальном конструкторском бюро по машинам для точного литья (СКБТЛ) создали машину для литья под давлением с механизмом прямого газового прессования [55]. Экспериментальный образец этой машины после лабораторных испытаний передали заводу «Эра» (г. Севастополь) и в 1982 г. ввели её в эксплуатацию.

Машина показала хорошие результаты: по большинству наименований отливок брак снизился от 20 до 3% при значительном упрощении обслуживания.

Из полученных результатов испытаний мы выделяем следующие их особенности:

- значительно упрощена конструкция механизма прессования [55] за счёт отсутствия в нём разделителя, мультипликатора и соответствующего количества гидроаппаратуры;

- высокая стабильность работы механизма прессования вследствие постоянства давления газа в поршневой полости силового цилиндра и наличия регулировки скорости прессования на сливе рабочей жидкости из штоковой полости силового цилиндра;

- малое время нарастания статического давления на металл в пресс-форме (0,007-0,010 с), что определяется постоянством давления газа в поршневой полости силового цилиндра и регулировкой давления рабочей жидкости на сливе её из силового цилиндра.

15.4. *Предотвращение образования остаточных усадочных пор и усадочных трещин в отливке по стадиям её формирования* [32, табл. 1].

15.4.1. А. И. Вейник в работе [59, с. 141-242] теоретически и экспериментально изучал формирование изделия в условиях литья под давлением. Из этой работы для решения нашей задачи в разделе 15.4. мы заимствуем следующие факты:

- «...внутренняя поверхность пресс-формы, соприкасающаяся с расплавленным металлом, практически мгновенно приобретает температуру, близкую к температуре расплава. С течением времени, по мере охлаждения отливки, температура поверхности пресс-формы постепенно уменьшается и становится равной средней температуре пресс-формы».

- «Более высокая температура пресс-формы по сравнению с температурой залитого металла объясняется его разогревом за счёт сил трения» [59, с. 159].

15.4.2. В условиях доказанного выше (п. 5.4.1.) быстрого – практически мгновенного – теплообмена в процессе литья под давлением и экспериментально выявленного малого (0,007-0,010 с) нарастания давления на металл отливки в пресс-форме образование усадочных пор и усадочных трещин в отливке физически невозможно.

### **Выводы**

- Следовательно, изложенная в разделах 11, 12, 13, 14, 15 «Задача-2 о формировании плотных, безусадочных трещин, отливок при наименьшем, достаточном расходе металла на отливку» решена.

- Далее, согласно концепции по п. 12.1.3, решение нашей задачи-2 должно быть доказано. Для чего предложенное решение задачи-2 разделяем на две части: технологическая – о формировании плотных, безусадочных трещин, отливок; математическая – оптимизация (специальным методом) наименьшего достаточного расхода металла на отливку.

## Затвердевание сплавов

- Доказательством истинности решения технологической части задачи-2 является работа раздела 13 (развитие понятий об усадочной пористости с интегральной мерой в топологической модели элементарной отливки).
- Доказательством истинности решения математической части задачи-2 является функционирование математической модели раздела 14 (метод расчёта и проектирования предлагаемой оптимальной технологии формирования отливок).
- Наконец, вводим наименование для созданной научно-технической продукции – «11. Задача-2 о формировании плотных, безусадочных трещин, отливок при наименьшем достаточном расходе металла на отливку: раскрыта, математически описана и решена последовательно в разделах 13, 14, 15», совместно О. А. Кострицей и В. Г. Кострицей в порядке обсуждения.

### Условные обозначения

Символы:  $M$  – масса, кг;  $P$  – пористость;  $\rho$  – плотность, гк/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время (продолжительность цикла изготовления отливки), с;  $T$  – температура, К;  $U$  – усадка;  $V$  – объём,  $\varepsilon$  – критерий сжатия;  $\xi$  – число сжатия.

Индексы нижние (буквы): зал – заливка;  $i$  – начало стадии изготовления отливки;  $j$  – окончание стадии изготовления отливки;  $m$  – металл;  $n$  – наружная;  $об$  – общее значение;  $от$  – отливка;  $p$  – пора;  $y$  – усадочная;  $\phi$  – форма.

Индексы нижние (цифры): 0 – начальное значение температуры в момент окончания заполнения полости формы металлом и образования отливки; 1, 2, 3 – последующие значения температуры металла соответственно: 1 – ликвидус, 2 – солидус, 3 – окружающая среда.

Индексы верхние (штрихи): ' (один штрих) – меньшее значение параметра, '' (два штриха) – большее значение параметра.

Примеры обозначений  $V_{n,y}(T)$  – объём усадочных пор в отливке при температуре её  $T$ , м<sup>3</sup>;  $V_{n,y}(T_{1-2})$  – объём усадочных пор в отливке при температуре  $T_2$ , образованных в процессе охлаждения её от  $T_1$  до  $T_2$ , м<sup>3</sup>;  $P'$  – пористость отливки, части её, измеренная (выраженная) в разностной форме.



### Список литературы

54. Развитие формул Нехендзи-Гиршовича в науке о литье. Сообщение 3 / В. Г. Кострица О. А. Кострица // Процессы литья. – 2014. – № 2. – С. 34-49.
55. А.с. 393035 [СССР]. Поливанов В.В., Кострица В.Г. Механизм прессования машины для литья под давлением. – Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки». – 1973. – №33. – С. 37.
56. А.с. 486860 [СССР]. Поливанов В. В., Кострица В. Г. Механизм прессования машины для литья под давлением. – Оpubл. 05.10.1975. Бюл № 37, 14.01.1976.
57. А.с. 500886 [СССР]. Кострица В. Г., Поливанов В. В. Механизм прессования машины для литья под давлением. – Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Товарные знаки», 1976, № 4. – С. 27.
58. Математическая энциклопедия. Т. 1, 94 стб. Аддитивность. М.: «Советская энциклопедия», 1977.
59. Вейник А. И. Теория особых видов литья. – М.: Машгиз, 1958. – 300 с.

Поступила 22.07.2015